

만곡부에서 이론식에 기반한 횡분산계수 경험공식 개발

Development of Empirical Formula for Transverse Dispersion Coefficient Based on Theoretical Equation in River Bends

백경오*

Baek, Kyong Oh

Abstract

In this study, a new empirical equation for the transverse dispersion coefficient has been developed based on the theoretical background in river bends. The nonlinear least-square method was applied to determine regression coefficients of the equation. The estimated dispersion coefficients derived by the new equation were compared with observed transverse dispersion coefficients acquired from natural rivers and coefficients calculated by the other existing empirical equations. From a comparison of the existing transverse dispersion equations and the new proposed equation, it appears that the behavior of the existing formula in a relative sense is very much dependent on the friction factor and the river geometry. However, the new proposed equation does not vary widely according to variation of friction factor. Also, it was revealed that the equation proposed in this study becomes an asymptotic curve as the curvature effect increases.

Keywords: transverse dispersion coefficient, theoretical equation, empirical equation, friction factor, river bend

요 지

본 연구에서는 이론적 배경을 토대로 사행 하천의 만곡부에 적용하기 용이한 횡분산계수 경험공식을 새롭게 제안하였다. 차원해석을 통한 독립변수들의 선정 대신 이론식을 기반으로 독립변수들과 그들의 함수형태를 우선 결정하였다. 결정된 함수식에서 매개변수를 골라내고 이를 고정하는 대신 회귀계수로 전환하여 실제 하천 만곡부에 적합한 경험식을 비선형회귀분석을 통해 제안하였다. 기존의 횡분산계수식들과 비교해 보면 본 연구에서 개발된 식이 관측 분산계수와 대체적으로 일치하는 경향을 보였다. 개발된 식의 특징을 살펴보면 마찰항에 대한 민감도가 상대적으로 적어 조도가 작은 하천에도 적용하기에 무리가 없어 보인다. 또한 개발된 식은 수심 대비 사행반경의 비가 큰 경우에도 기존의 추정식처럼 이상치를 나타낼 우려가 없어 만곡이 심한 사행하천에 적용하기 적합하다.

핵심용어: 횡분산계수, 이론식, 경험식, 마찰항, 만곡부

1. 서 론

자연하천에서 보존성 물질의 이동 과정을 이송-분산 방정식으로 해석하고자 할 때, 결정해야 할 매개변수로서 분산계수(dispersion coefficient)가 있다. 분산계수는 하천에서 오염물의 혼합능(mixing capacity)를 파악할 수 있는 대표적인 인자이기 때문에 그것의 결정과정에 신중을 기하여야 한다. 분산계수를 결정하는 방법에는 농도 자료를 이용하는 관측법(observing method)과 농도자료가 없는 경우, 기본 수리량을 이용하는 추정법(estimated method)으로 크게 나눌 수 있다. 여기서 추정법은 전단류의 영향을 고려하여 이론적으로 분산계수식을 유도하는 이론식(theoretical equation)과 다수의 농도실험 자료를 바탕으로 회귀분석을 통해 분산계수를 취득하는 경험식(empirical equation)으로 또한 분류할 수

있다. 하지만 이론식의 난해함을 경험적 방법론으로 간략화 하기도 하며 이론적 배경에 바탕을 둔 경험식을 개발할 수도 있으므로, 두 가지 방법론은 배치되기 보단 상호 보완적인 관계에 있다(백경오와 서일원, 2007). 이상의 분산계수 결정 방법론을 도식화하면 그림 1과 같다.

2차원 물질이동 방정식의 두 매개변수(종분산과 횡분산계수) 중 횡분산계수는 그동안 많은 연구자들에 의해 연구가 진행되어 왔다. 약 45년 전에 Fischer(1967)는 인공 운하에서 무차원 횡분산계수를 다음과 같은 간략식으로 제안한 바 있다.

$$\frac{D_T}{hu_*} = 0.15 \quad (1)$$

여기서 D_T 는 횡분산계수, h 는 수심, u_* 는 마찰유속(frictional velocity)이다. 이후 Rutherford(1994)는 그 동안의 연구결과

*정회원 · 국립환경대학교 토목공학과 교수 (E-mail : pko@hkn.ac.kr)

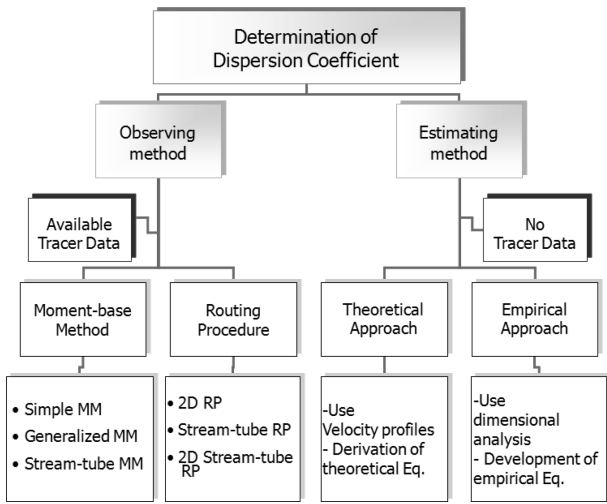


그림 1. 분산계수를 결정하는 방법론

들을 종합하여 다음과 같은 범위로 무차원 횡분산계수를 정리한 바 있다.

$$\begin{aligned} \frac{D_T}{hu_*} &= 0.15 \sim 0.30 && \text{직선수로에서} \\ &= 0.30 \sim 0.90 && \text{사행수로에서} \\ &= 1.00 \sim 3.00 && \text{급한 만곡부에서} \end{aligned} \quad (2)$$

이러한 간략식들은 하천의 지형조건에 따라 대략적인 횡분산계수치에 대한 정보를 제공하는 장점이 있으나, 오차 범위가 상당히 크므로 보다 정확한 값 산출을 위해 이론적인 접근법도 시도되었다. Fischer(1969)는 Rozovskii(1957)가 제안한 횡방향 유속의 연직 분포식을 사용하여 최초로 횡분산계수를 다음과 같은 이론식으로 제안하였다.

$$\frac{D_T}{hu_*} = \frac{I_1}{\kappa^5} \left(\frac{\bar{u}}{u_*} \right)^2 \left(\frac{h}{r_c} \right)^2 \quad (3)$$

여기서 κ 는 von karman상수, \bar{u} 는 수심평균된 종방향유속, r_c 는 사행반경(radius of curvature)이고, I_1 은 삼중적분하여 얻게 되는 값으로 다음을 계산해야 한다.

$$I_1 = - \int_0^1 v' \int_0^{z'} \frac{1}{\varepsilon'} \int_0^{z''} v'' dz'' dz' dz' \quad (4)$$

여기서 v' 는 무차원 횡방향유속, ε' 는 무차원 연직확산계수, z' 는 무차원 연직방향좌표이다. 식 (4)를 계산하기가 까다로워 적용성에 문제가 있었으므로, Fischer (1969)는 실험실에서 수행된 농도 자료를 바탕으로 식 (3)을 다음과 같이 단순화시켰다.

$$\frac{D_T}{hu_*} = 25 \left(\frac{\bar{u}}{u_*} \right)^2 \left(\frac{h}{r_c} \right)^2 \quad (5)$$

Yotsukura와 Sayre(1976)는 식 (5)를 실제 하천에 적용하면 큰 오차가 발생함을 보이고, 대안으로 식 (6)처럼 수심(h) 대신 하폭(W)을, 25 대신 0.4를 사용해야 한다고 주장하였다.

$$\frac{D_T}{hu_*} = 0.4 \left(\frac{\bar{u}}{u_*} \right)^2 \left(\frac{W}{r_c} \right)^2 \quad (6)$$

이후 Sayre(1979)는 Missouri River에서 추가적인 농도실험을 통해 식 (6)을 수정하여, 다음과 같은 범위로 제안하였다.

$$\frac{D_T}{hu_*} = (0.3 \sim 0.9) \left(\frac{\bar{u}}{u_*} \right)^2 \left(\frac{W}{r_c} \right)^2 \quad (7)$$

최근에 Jeon 등(2007)은 차원해석 후 회귀분석을 하는 전형적인 경험식 개발법을 사용하여 다음과 같은 추정식을 제안한 바 있다.

$$\frac{D_T}{hu_*} = 0.029 \left(\frac{\bar{u}}{u_*} \right)^{0.463} \left(\frac{W}{h} \right)^{0.299} (S_n)^{0.733} \quad (8)$$

여기서 S_n 은 사행도(sinuosity)로 사행 대비 직선의 길이비이다.

이상의 연구결과들에서 보듯이 사행하천에서 횡분산계수는 만곡부에서 발생하는 복잡한 현상들로 인해 기본적인 수리량으로 정량화하여 표현하기에 어려움이 많다. 이론적 배경을 기초로 유도된 식은 물리적 함의를 포함하고는 있으나, 현장적용에 어려움이 많고 계산과정 또한 복잡하다. 반면 분산자료를 토대로 경험적으로 개발된 식들은 현장 적용에 간편성이 있으나, 만곡부의 복잡한 분산 메커니즘을 반영하지 못한다. 따라서 본 연구에서는 횡분산계수 산정에 있어서 이론적 접근법과 경험식을 접목하여 새로운 추정식을 제안하고자 한다. 이를 위해 먼저 차원해석을 통한 독립변수들(무차원 수리량과 지형인자 등)의 선정 대신 이론식을 기반으로 독립변수들과 그들의 함수형태를 결정한다. 결정된 함수식에서 매개변수를 골라내고 이를 고정하는 대신 회귀계수로 전환하여 실제 사행하천에 적합한 경험식을 새로 개발하였다. 개발된 식을 기존의 식들과 비교하여 그 정확도를 검증해 보았다.

2. 횡분산계수 이론식

그림 2와 같은 사행하천에서 주 흐름방향 좌표를 x , 여기에 평면적으로 직교하는 좌표를 y , 연직 직교 좌표를 z 라 했을 때, 2차류(secondary flow)에 의한 횡분산계수는 다음과 같은 이론식으로 도출될 수 있다(Fischer, 1969; Fischer et al., 1979).

$$D_T = -\frac{1}{h} \int_0^h v(z) \int_0^z \frac{1}{\varepsilon} \int_0^z v(z) dz dz dz \quad (9)$$

여기서 v 는 횡방향유속, ε 은 연직확산계수이다. Rozovskii (1957)가 제안한 횡방향 유속의 연직 분포식은 다음과 같다.

$$v(z) = \frac{\bar{u} h}{\kappa^2 r_c} \left(\int \frac{2 \ln(z/h)}{z-h} dz - \frac{1}{\kappa} \frac{u_*}{\bar{u}} \int \frac{\ln^2(z/h)}{z-h} dz \right) \quad (10)$$

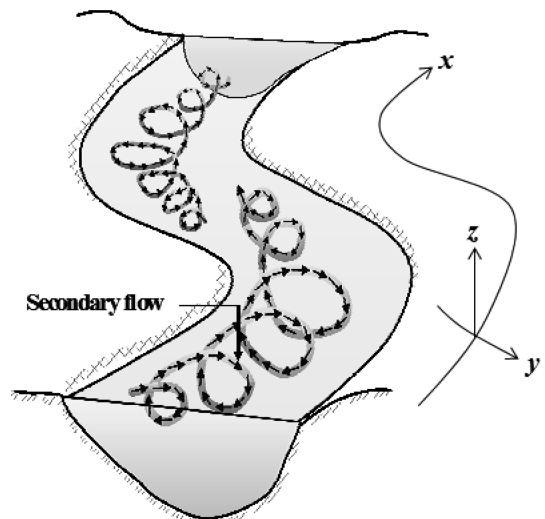


그림 2. 교호하는 사행하천에서 2차류 분포

연직확산계수는 연직방향에 대해 다음과 같은 포물선형 분포를 갖는다(Elder, 1959).

$$\varepsilon(z) = \kappa u_* z \left(1 - \frac{z}{h}\right) \quad (11)$$

횡방향유속(식 10)과 연직확산계수(식 11)를 식 (9)에 대입하여 계산을 수행하면 서론부에서 언급한 Fischer (1969)의 횡분산계수 이론식(식 3)이 도출된다.

그런데 식 (3)은 분산계수치를 과대 산정하는 경향이 있는데, 그 이유를 살펴보니 식 (9)에 횡방향 유속의 최대치를 대입해서 계산했기 때문이었다. 다시 말해 식 (10)은 단일 만곡부에서 완전히 발달한 횡방향 유속(fully developed velocity)을 표현한 식이다. 하지만 실제 사행하천에서 횡방향 유속은 그림 2에서 보듯이 늘 일정하게 생성되는 것이 아니다. 처음 만곡의 입구에서는 미미하다가 만곡의 정점부를 지나면서 완전 발달 유속을 형성하고, 다시 직선부를 만나면 소멸하였다가 만곡의 방향이 바뀌면 반대 방향의 유속 분포를 갖는 과정을 반복한다. 종방향을 따라 변화하는 2차류의 이러한 거동을 Rozovskii(1957)는 다음과 같은 지수함수로 또한 제시한 바 있다.

$$\begin{aligned} G(x) &= 1 - \exp\left(-2\kappa \frac{u_* x}{u h}\right) && \text{증가향} \\ &= \exp\left(-2\kappa \frac{u_* x}{u h}\right) && \text{감소향} \end{aligned} \quad (12)$$

흐름이 만곡부의 입구에 들어서면 식 (10)에 식 (12)의 증가향을 곱하고, 만곡을 빠져나오면 식 (12)의 감소향을 곱하는 방식으로 횡방향유속의 종방향 변화 양상을 재현할 수 있다. Boxall과 Guymer(2003)는 식 (12)를 도입하여 Fischer (1969)의 식을 수정하였는데, 증가향만을 고려하여 분산계수를 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{D_T}{hu_*} = \frac{I_1}{\kappa^2} \left(\frac{\bar{u}}{u_*}\right)^2 \left(\frac{h}{r_c}\right)^2 \left(1 - \exp\left(-2\kappa \frac{u_* x}{u h}\right)\right)^2 \quad (13)$$

최근에 Baek과 Seo(2011)는 횡분산계수 이론식을 새롭게 제안하였는데, 우선 계산의 간편성을 도모하고자 횡방향 유속의 연직분포식을 Odgaard(1986)의 제안을 따라 다음과 같이 선형식으로 표현하였다.

$$v(z) = v_s \left(2\frac{z}{h} - 1\right) \quad (14)$$

여기서 v_s 는 수표면에서의 횡방향 유속이다. 그리고 그들은 앞서 지적한 횡방향 유속의 종방향 변화 양상을 v_s 에 반영하여 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$v(x) = \frac{A_1}{A_2} (1 - \exp(-A_2 x)) + v_s^i \exp(-A_2 x) \quad (15)$$

여기서 v_s^i 는 초기에 존재하는 수표면 횡방향유속이고, A_1, A_2 는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$A = \frac{\left(2\kappa \frac{\bar{u}}{u_*} + 1\right) \frac{\bar{u}}{u}}{\kappa \frac{\bar{u}}{u_*} \left(\kappa \frac{\bar{u}}{u_*} + 1\right)^{r_c}} \quad (16a)$$

$$A_2 = \frac{2\kappa^2}{\left(\kappa \frac{\bar{u}}{u_*} + 1\right) h} \quad (16b)$$

식 (15)에서 초기에 존재하는 횡방향유속이 없다($v_s^i = 0$)고 가정 한 후 이를 식 (11)과 함께 식 (9)에 대입하여 삼중적분하면 다음과 같은 횡분산계수식을 얻을 수 있다.

$$\frac{D_T}{hu_*} = \frac{1}{24\kappa^7} \left(2\kappa \frac{\bar{u}}{u_*} + 1\right)^2 \left(\frac{h}{r_c}\right)^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{2\kappa^2}{\left(\kappa \frac{\bar{u}}{u_*} + 1\right) h} x\right)\right)^2 \quad (17)$$

만곡부에서 횡방향 유속의 종방향 변화 양상까지 고려하여 유도된 두 횡분산계수 이론식(식 13과 17)은 언뜻 보기에 서로 달라 보이지만, 몇 가지 가정을 거치면 유사한 형태의 식으로 변형가능하다. 먼저 자연하천에서 수심평균유속 대 마찰유속의 비(\bar{u}/u_*)가 25 이내 이므로 다음과 같은 근사가 가능하다.

$$2\kappa \frac{\bar{u}}{u_*} + 1 \approx \frac{\bar{u}}{u_*} \quad (18)$$

그리고 단일 만곡부에서 종방향 거리는 원호의 길이로 대체할 수 있다.

$$x = r_c \theta \quad (19)$$

여기서 θ 는 원호의 각도이다. 식 (18)과 (19)를 식 (13)과 (17)에 각각 대입 후 정리하면 두 식(식 13과 17)은 다음과 같은 간단한 식으로 변형될 수 있다.

$$\frac{D_T}{hu_*} = a(P)^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{b}{P}\right)\right)^2 \quad (20)$$

여기에서 a, b 는 상수이며, P 는 다음과 같은 무차원 수리량이다.

$$P = \frac{\bar{u}h}{u_* r_c} \quad (21)$$

3. 경험공식의 개발

본 연구에서는 식 (20)을 회귀함수로 삼아 실험실 및 자연하천에서 실험을 통해 취득된 분산자료를 바탕으로 하여 새로운 경험공식을 유도하였다. 식 (20)에서 보듯이 이론적으로 횡분산계수에 영향을 주는 무차원 수리량은 \bar{u}/u_* 와 h/r_c 의 곱(P)임이 명확해졌고, 2차류의 증가분은 지수함수로 표현되었으니 회귀계수들만 결정되면 경험식이 완성될 수 있다. 회귀분석을 수행하기 전에 식 (20)을 다음과 같이 약간 변형하였다.

$$\frac{D_T}{hu_*} = (\alpha P)^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{\beta}{P}\right)\right)^2 \quad (22)$$

여기서 α, β 는 회귀계수들이다. 그리고 이 회귀계수들의 변화에 따른 분산계수의 민감도를 그림 3에 도시하였다. 이 그림에서 보듯이 식 (22)는 지수함수가 곱해져 있는 꼴이라서 α 와 β 가 증가하더라도 무한히 분산계수치가 증가하지는 않는다. 이는 본 식의 장점 중의 하나라고 사료되는데, 그 이유는 Rutherford(1994)가 식 (2)에서 정리했듯이 자연하천에서 무차원 횡분산계수의 변동폭이 그다지 크지 않기 때문이다(최소 최대치의 차이가 10배 이내). 반면 지금까지 여러 연구자들에 의해 제안된 분산계수들은 공식에 주로 제곱항이 포함하고 있어서 수리량에 너무 민감하게 반응하였다. 그 결과 계산된 값이 실제 분산계수와 동떨어지게 큰 경우가 많았다(Seo와 Baek, 2004).

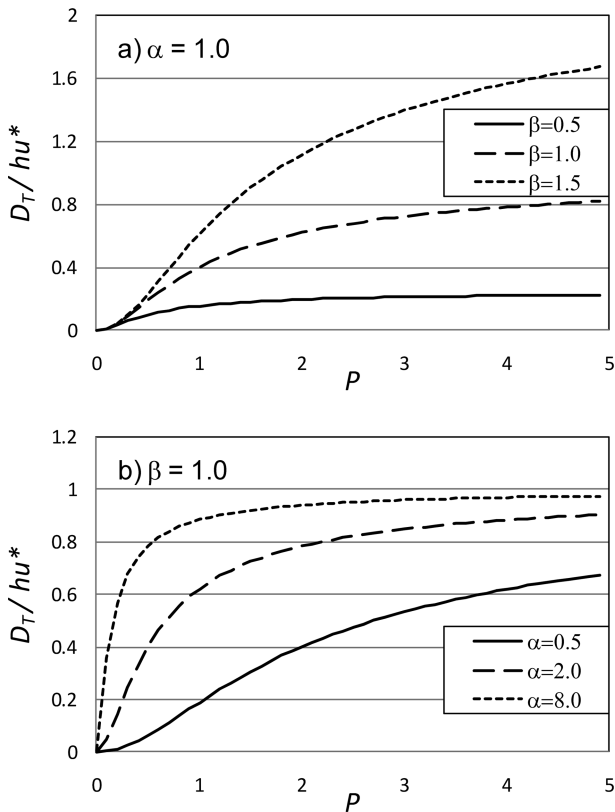


그림 3. 회귀계수에 따른 무차원 횡분산계수의 민감도

표 1. 실험실 사행수로에서 수행된 분산실험 (Fischer, 1969)

Case No.	h (cm)	u (cm/s)	u^* (cm/s)	r_c (cm)	u/u_*	h/r_c	P
Run 2	3.02	31.70	2.66	206	11.9	0.015	1.242
Run 3	5.28	27.00	1.70	206	15.9	0.026	2.894
Run 4	3.72	26.80	2.13	206	12.6	0.018	1.615
Run 5	2.03	19.00	1.37	206	13.9	0.010	0.972
Run 6	2.20	19.70	1.68	206	11.7	0.011	0.890

회귀계수 α , β 를 결정함에 있어서 실험실에서 취득된 분산자료와 실제 자연하천에서 취득된 자료를 이용하여 각각 두 개의 회귀식을 제안하였다. 물론 실험실 자료를 기반으로 개발된 식은 단지 참고용일 뿐이고, 자연하천의 분산자료를 이용한 경험식이 본 연구의 최종 결과물이다. 실험실 분산자

료는 Fischer(1969)가 식 (5)를 개발하는데 사용하였던 자료를 이용하였다. 그는 270°의 원형수로에서 90°지점에서 추적자를 주입한 후 180°지점에서 농도자료를 취득하여 분산계수를 관측하였다. 이 실험은 5 set의 유황조건으로 수행되었는데, 이를 정리하면 표 1과 같다. 실제 자연하천 자료는 11 set의 분산자료를 사용하여 경험식을 유도하였다. 2차원 횡분산 실험은 연구결과가 많지 않을 뿐더러, 그 중에서 만족부에서 수행된 실험만을 고르다 보니 자료수가 많지는 않다. 이를 정리하면 표 2와 같다.

식 (22)가 비선형 방정식의 형태이므로, 회귀분석 기법도 비선형 알고리즘의 하나인 Gauss-Newton법을 이용하여 각각의 회귀계수들을 결정하였다. 실험실 자료(표 1)와 자연하천 자료(표 2)를 기반으로 도출된 회귀식은 각각 다음과 같다.

$$\frac{D_T}{hu_*} = (7.11P)^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{3.21P}\right)\right)^2 \quad (23)$$

$$\frac{D_T}{hu_*} = (96.33P)^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{104.09P}\right)\right)^2 \quad (24)$$

식 (23)과 (24)의 회귀과정을 도시하면 그림 4와 같다. 이 그림에서 보듯이 상관계수는 실험실 자료가 상대적으로 높아 보이지만, 자료 개수도 작고 동일한 수로에서 수행된 실험이라 큰 의미는 없다고 할 수 있다. 오히려 둘 사이의 가장 큰 차이는 무차원 수리량 P 의 범위에 있는데, 약 10배 정도 실제 하천과 차이를 보인다. 특히 표 1과 2를 보면 알 수 있듯이 \bar{u}/u_* 의 범위는 실험실 수로 11~15, 자연하천 3~24로 차이가 상대적으로 크지 않는 반면, h/r_c 의 범위는 실험실 수로 0.011~0.026, 자연하천 0.0008~0.0037로 그 차이가 크다. 실험실 수로는 사행반경을 실제보다 작게 잡거나, 혹은 반대로 수심은 크게 하여 자연하천에서 벌어지는 분산현상을 제대로 모사하지 못하는 경우가 많다. 이는 비단 Fischer(1969)의 실험뿐만 아니라 횡분산을 목적으로 실험실에서 수행된 다수의 실험들(Almquist와 Holley, 1985; Boxall과 Guymer, 2003; Baek et al., 2006)에서도 이러한 오류가 발견된다. 결국 식 (23)은 참고용일 뿐이고, 식 (24)가 본 연구에서 개발한 자연하천 만족부에 적용 가능한 횡분산계수 경험 공식이라 말할 수 있겠다. 끝으로 식 (24)에서 두 개의 회귀계수 값간 차이가 많지 않으므로 다음과 같이 회귀계수 하나를 줄여서 표현할 수도 있다. 특히 비선형

표 2. 자연하천 만족부에서 수행된 분산실험

Researcher	River	h (m)	u (m/s)	u_* (m/s)	r_c (m)	W (m)	u/u_*	h/r_c	P
Fischer (1967)	Missouri	2.70	1.75	0.074	3400	-	23.65	0.0008	0.019
Holley & Abraham (1973)	Ijssel	4.00	0.97	0.076	1923	69.5	12.76	0.0021	0.027
Sayre (1979)	Missouri	1.99	1.39	0.074	792	214	18.78	0.0025	0.047
	Missouri	2.94	1.58	0.074	792	214	21.35	0.0037	0.079
Lau & Krisnappen(1981)	Grand	0.51	0.35	0.069	310	59.2	5.07	0.0016	0.008
Holley & Nerat (1983)	Isere	2.25	1.40	0.059	1612	70	23.73	0.0014	0.033
Seo & Baek (2006)	Chengmi	0.48	0.34	0.063	397	44.5	5.40	0.0012	0.006
	Sum	0.69	0.34	0.047	381	54	7.23	0.0018	0.013
	Hongchen	0.55	0.54	0.040	437.5	58.6	13.50	0.0013	0.017
	Hongchen	1.10	0.21	0.057	559	69.9	3.68	0.0020	0.007
	Hongchen	0.97	0.20	0.053	355	67	3.77	0.0027	0.010

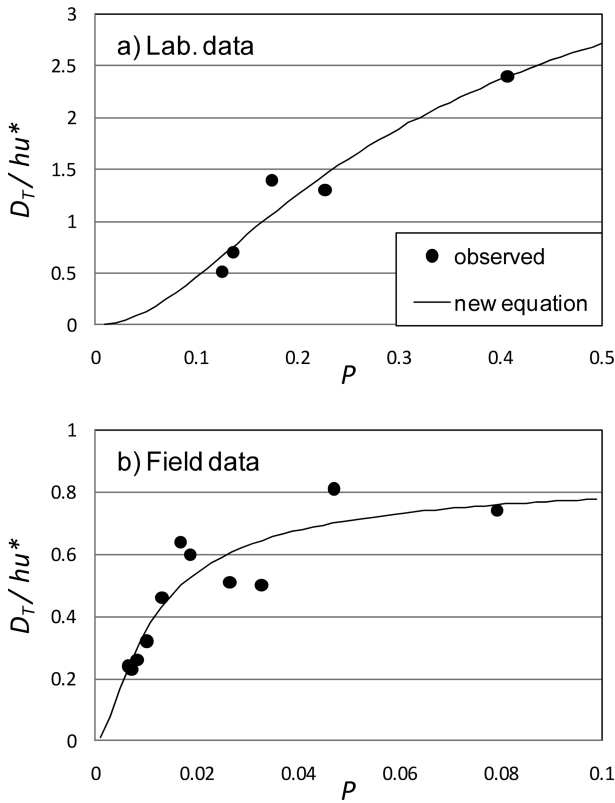


그림 4. 실험결과와 현장자료를 이용한 회귀분석

회귀분석에서는 자유도를 줄여 주는 것이 식의 정확도를 높이는 방법 중의 하나이다.

$$\frac{D_T}{hu_*} = (\gamma P)^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{\gamma P}\right) \right)^2 \quad (25)$$

여기서 γ 는 회귀계수이다. 식 (25)를 기반으로 동일한 분산 자료를 통해 하나의 회귀계수를 결정해 보면 다음과 같은 식이 도출된다.

$$\frac{D_T}{hu_*} = (79.6P)^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{79.6P}\right) \right)^2 \quad (26)$$

4. 기존식과의 비교

본 연구에서 개발한 식 (26)과 기존에 제안된 횡분산계수 경험식들과의 비교를 통해 새로운 식의 정확도를 검토해 보았다. 앞서 서론부에서 여러 연구자들의 식들을 소개한 바 있으나, 이 중 자연하천의 만곡부에 적용 가능한 식(사행반경이나 사행도 등이 포함된 경우)과 범위가 아닌 하나의 값으로 제안된 식을 골라보면 식 (6) (Yotsukura와 Sayre, 1976)과 식 (8) (Jeon 등, 2007) 두 개 뿐이다. 이 두 식과 본 연구의 결과인 식 (26)을 사용하여 계산된 횡분산계수와 관측된 횡분산계수를 비교, 도시하면 그림 5와 같다. 참고로 이 그림에는 Fischer(1969)의 실험실 자료와 그것으로 도출된 이론식(식 5)의 적용 결과도 함께 도시하였다. 이 그림에서 보듯이 본 연구 결과와 Jeon 등의 결과는 관측 분산계수를 잘 근사하고 있는 반면에 Yotsukura와 Sayre의 결과는 산포하는 경향을 보인다. 그 이유는 Yotsukura와 Sayre의 식 형태가 오직 제곱항으로만 구성되어 있어서 수리량에 민감하게 반응하였기 때문으로 사료된다. 다음으로 경험식으로 계산된 분산계수 추정치와 관측치간의 상관계수를

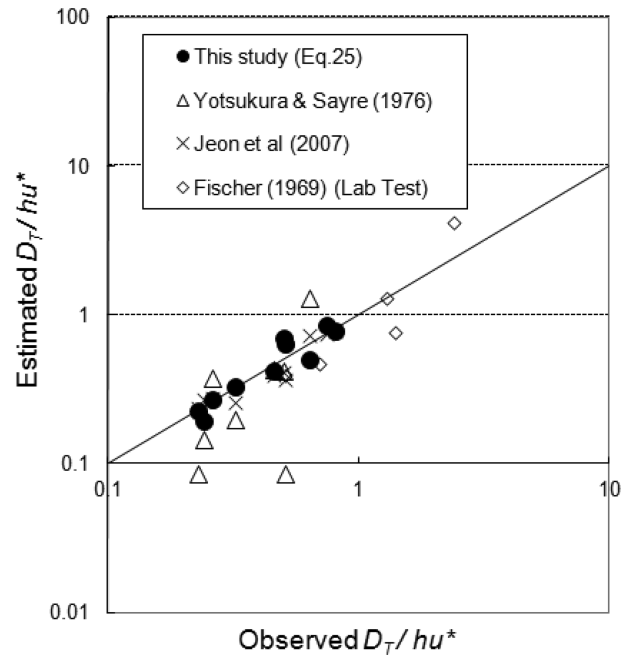


그림 5. 분산계수의 실측치와 추정치의 비교

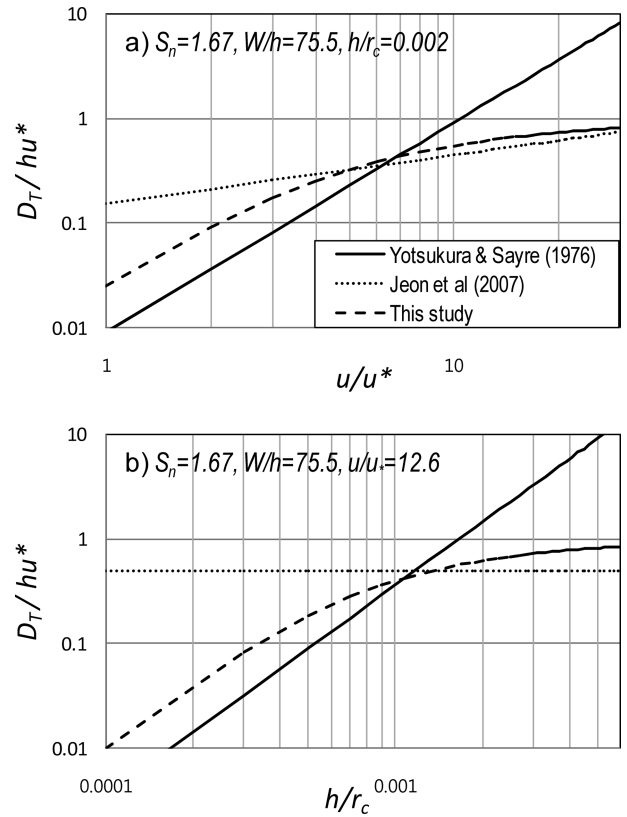


그림 6. 무차원 수리량에 따른 경험식들의 민감도

보면 Jeon 등의 값($r=0.95$)이 본 연구의 값($r=0.91$)보다 조금 나은 결과를 보이고 있다. 그 이유는 Jeon 등의 경험식이 바로 본 연구에서 사용한 11 set의 분산자료를 모두 이용하여 도출된 식이기 때문이다. 비록 Jeon 등의 경험식이 약간 나은 결과를 보여주고는 있지만, 본 연구에서 개발한 식에 비해 이론적 배경이 부족하다는 한계를 가지고 있다.

비교된 세 가지 분산계수 추정식들이 수리량의 변화에 얼마나 민감하게 반응하는지 살펴보았다. 우선 제반 수리량들은 고정시키고 마찰항(\bar{u}/u_*)만을 변화시켰을 때 횡분산계수의 거동을 그림 6a)에 도시하였다. 여기서 고정된 수리량들

은 본 연구에서 사용된 하천들의 평균적인 수리량들이다. 이 그림에서 보듯이 Yotsukura와 Sayre의 식은 \bar{u}/u_* 의 값이 커질수록 분산계수치도 지속적으로 증가하고 있다. 특히 \bar{u}/u_* 의 값이 10에서 30으로 증가하는 사이 분산계수는 10 배 가까이 증가하는 경향을 보여서, 조도가 작은 하천에 이 식을 적용하기에는 무리가 따를 것으로 보인다. 반면 본 연구에서 개발된 식과 Jeon 등의 식은 \bar{u}/u_* 이 커지더라도 분산계수가 무한정 증가하지 않고 증가율이 감소하는 추세를 보인다. 다음으로 제반 수리량들은 고정시키고 수심 대 사행 반경비(h/r_c)만을 변화시켰을 때 횡분산계수의 거동을 그림 6b)에 도시하였다. 이 그림에서도 보듯이 Yotsukura와 Sayre의 식은 h/r_c 이 커지면 지속적인 증가 추세를 보이는 반면, 본 연구에서 개발된 식은 일정한 값으로 수렴이 되어, 만곡이 심한 구간에서도 이상치를 보이지 않고 적절한 분산계수를 산출할 것으로 예상된다.

5. 결 론

사행하천에서 횡분산계수는 만곡부에서 발생하는 복잡한 현상들로 인해 하천의 기본적인 수리량이나 지형자료만으로 표현하기에 어려움이 많다. 그럼에도 불구하고 지금까지 여러 연구가들에 의해 이론적 또는 경험적으로 분산계수를 표현하는 공식들이 제안되어 왔었다. 이론적 배경을 기초로 유도된 식은 물리적 함의를 갖고 있으나, 현장 적용에 어려움이 많고 계산과정 또한 복잡하였다. 반면 실험자료를 토대로 경험적으로 개발된 식들은 현장 적용에 간편성이 있으나, 만곡부의 복잡한 분산 메커니즘을 구체적으로 반영하지 못하는 약점이 있었다. 본 연구에서는 횡분산계수 산정에 있어서 이론적 접근법과 경험식을 접목하여 새로운 추정식을 제안하였다. 먼저 차원해석을 통한 독립변수들의 선정 대신 이론식을 기반으로 독립변수들과 그들의 함수형태를 결정하였다. 결정된 함수식에서 매개변수를 골라내고 이를 고정하는 대신 회귀계수로 전환하여 실제 하천 만곡부에 적합한 경험식을 새로 개발하였다. 개발된 식의 정확도를 검증함에 있어서 사행하천의 만곡부에서 수행된 분산 실험 자료가 많지 않아 어려움이 있었으나, 기존의 식과 비교해 보면 본 연구에서 개발된 식이 관측 분산계수와 대체적으로 일치하는 경향을 보였다. 개발된 식의 특징을 살펴보면 마찰항에 대한 민감도가 상대적으로 적어 조도가 작은 하천에도 적용하기에 무리가 없어 보였다. 또한 개발된 식은 수심 대비 사행반경의 비가 큰 경우에도 기존의 추정식처럼 이상치를 나타낼 우려가 없어 만곡이 심한 사행하천에 적용하기 적합해 보였다.

감사의 글

이 연구는 교육과학기술부 한국연구재단의 기초연구사업 지원(과제번호:2012-0008575) 및 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(11-기술혁신-C06)에 의해 수행되었습니다.

백경오, 서일원(2007) 전단류에 의한 횡분산계수의 산정, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권 제1B호, pp. 21-28.

Almquist, C.W. and Holley, E.R. (1985) *Transverse mixing in meandering laboratory channels with rectangular and naturally varying cross sections*. Technical Report CRWR-205, Univ. of Texas, Austin, Texas.

Baek, K.O. and Seo, I.W. (2011) Transverse dispersion caused by secondary flow in curved channels. *J. of Hydraulic Engineering*, Vol. 137, No. 10, pp. 1126-1134.

Baek, K.O., Seo, I.W., and Jung, S.J. (2006) Evaluation of dispersion coefficients in meandering channels from transient tracer tests, *J. of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 10, pp. 1021-1032.

Boxall, J.B. and Guymeyr, I. (2003) Analysis and prediction of transverse mixing coefficients in natural channels. *J. of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, No. 2, pp. 129-139.

Elder, J.W. (1959) The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow. *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 5, pp. 544-560.

Fischer, H.B. (1967) *Transverse mixing in a sand-bed channel*. Professional Paper No. 575-D, U.S. Geological Survey.

Fischer, H.B. (1969) The effect of bends on dispersion coefficients in streams. *Water Resources Research*, Vol. 5, pp. 496-506.

Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N.H. (1979) *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press, New York

Holley, E.R., Siemons, J., and Abraham, G. (1972) Some aspects of analyzing transverse diffusion in rivers. *J. of Hydraulic Research*, Vol. 10, No. 1, pp. 27-57.

Holly, F.M. and Nerat, G. (1983) Field calibration of stream-tube dispersion model. *J. of Hydraulic Engineering*, Vol. 109, No. 11, pp. 1455-1470.

Jeon, T.M., Baek, K.O., and Seo, I.W. (2007) Development of an empirical equation for the transverse dispersion coefficient in natural streams. *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 7, No. 4, pp. 317-329.

Lau, Y.L. and Krishnappan, B.G. (1981) Modeling transverse mixing in natural streams. *J. of Hydraulic Division*, Vol. 107, No. HY2, pp. 209-226.

Odgaard, A.J. (1986) Meander-flow model I: Development. *J. of Hydraulic Engineering*, Vol. 112, No. 12, pp. 1117-1136.

Rozovskii, I.L. (1957) *Flow of water in bends of open channels*. Academy of Science of Ukrainian SSR, Russia.

Rutherford, J.C. (1994) *River Mixing*. John Wiley and Sons, Chichester, UK.

Sayre, W.W. (1979) *Shore-attached thermal plumes in rivers*. In: Shen HW (ed) *Modelling in Rivers*. Wiley-Interscience, London.

Seo, I.W. and Baek, K.O. (2004) Estimation of the longitudinal dispersion coefficient using the velocity profile in natural streams. *J. of Hydraulic Engineering*, Vol. 130, No. 3, pp. 227-236.

Seo, I.W., Baek, K.O., and Jeon, T.M. (2006) Analysis of transverse mixing in natural streams under slug tests. *J. of Hydraulic Research*, Vol. 44, No. 3, pp. 350-362.

Yotsukura, N. and Sayre, W.W. (1976) Transverse mixing in natural channels. *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 4, pp. 695-704.

(접수일: 2012.9.18/심사일: 2012.11.1/심사완료일: 2012.11.6.)